

La question du statut de l'expérience en physique, *Cahiers d'Histoire et de philosophie des sciences* (Paris), n° 40, 1992, 183-197. [Actes du Colloque Les Procédures de preuve, de validation et d'évaluation dans les sciences et les techniques: une approche historique, Lille, 11-13 avril 1991.]
(Texte légèrement modifié depuis la publication de 1992).

LA QUESTION DU STATUT DE L'EXPERIENCE EN PHYSIQUE *

par

MICHEL PATY **

1. INTRODUCTION.

Le statut des expériences en physique est plus complexe qu'il n'y paraît, même au stade où l'on admet la validité du résultat expérimental. Car, ce résultat admis, se pose la question de sa signification. Pour l'empirisme (de l'empirisme logique à ses formes plus récentes), la question de la signification ne se pose pas au niveau du résultat expérimental lui-même, puisque c'est à lui que sont rapportées, fût-ce indirectement, les significations des propositions théoriques. Pourtant, si l'on pense qu'il y a une différence entre des énoncés qui expriment seulement des résultats d'expérience (par exemple, certains types de lois), et les théories, qui sont des constructions conceptuelles en forme de systèmes, et si l'on considère, dans cette perspective, qu'une théorie physique n'est pas simplement un 'système formel interprété', mais un système de concepts qui comprend les interprétations comme un effet de l'organisation systémique même¹, il faut admettre que le résultat expérimental ne porte pas lui-même sa

* Communication au Colloque *Les Procédures de preuve, de validation et d'évaluation dans les sciences et les techniques: une approche historique*, Lille, 11-13 avril 1991. On n'a gardé pour la publication qu'une partie du travail présenté, qui était intitulé initialement "Statut de l'expérience et nature de l'objet théorique". Un autre article, sous le titre "L'objet de la théorie et l'expérience", qui sera publié par ailleurs, complètera le présent travail dans la perspective initialement prévue.

** Equipe REHSEIS, UPR 318, CNRS,
et Université Paris 7, 2 Place Jussieu
75251 PARIS-cedex 05

¹ C'est-à-dire, en fait, interprété directement en vue de l'expérience et en rapport avec elle. Voir Paty (1992 a).

signification. Comment justifier que ce soit de l'instance théorique qu'il la reçoive? et sous quelles modalités?

La discussion philosophique reçoit ici le renfort précieux de l'analyse épistémologique et historique sur les circonstances réelles, fournie par les études de cas. Le statut controversé de la célèbre expérience de Michelson et Morley et de son rôle par rapport à la théorie de la Relativité restreinte est un bon témoin de la variabilité des significations à attacher à un résultat d'expérience, en fonction de la conception que l'on se fait de la nature de la théorie considérée et de son objet. La question se pose tant au niveau des travaux de 'découverte' (étudiés de manière comparative) qu'à celui de la réception, sous des formes spécifiques dans chaque cas.

Plus généralement, la théorie de la Relativité, de sa forme restreinte à sa généralisation, permet de mettre en évidence une relation directe entre la nature de l'objet théorique et la signification attachée aux résultats des expériences qui s'y rapportent. Les circonstances de la validation apparaissent différentes selon le type de théorie proposée (théorie purement cinématique ou théorie dynamique, modification du cadre conceptuel ou mécanisme d'explication). Le degré d'acceptation de la théorie (sur la base d' 'évidences' de nature empirique) est indiscutablement plus élevé dans le second cas, et apparaît donc être davantage fonction d'une idée normative sur la théorie que de l'administration particulière d'une preuve expérimentale (toutes choses égales par ailleurs, la validation expérimentale étant admise).

Telle est, en résumé, la thèse dont nous voudrions esquisser quelques éléments. Ces considérations concernent toutefois des cas de changements exceptionnels de théories et de systèmes conceptuels. Révélatrices quant au problème posé en commençant, elles n'épuisent pas la question de la preuve et de la précision à propos de cas plus communs.

Nous examinerons, dans ce qui suit, quelques aspects du 'statut des expériences' en physique et, en détaillant certains d'entre eux, ce qu'il faut entendre par 'signification d'un résultat expérimental'. Cette étude devra être prolongée par l'examen plus spécifique du rapport d'une expérience, considérée à tort ou à raison comme privilégiée, à la nature de la théorie qu'elle est censée valider. Alors seulement serons-nous en mesure de tirer de ces considérations des enseignements, selon la perspective indiquée, sur le lien entre la valeur attachée à une expérience et la nature de l'objet théorique auquel on la rapporte².

2. EXPERIENCE-TYPE.

Par 'statut des expériences', nous entendrons les divers aspects de leur nature et de leur rôle comme moyen d'administration de la preuve quant à la validité d'une théorie, et nous nous placerons dans le cas de la physique. Pour nous faire une idée intuitive de ces divers aspects tels que nous allons les énoncer,

² Voir la note 1.

il est utile de proposer la considération d'une expérience-type que nous garderons à l'esprit. Nous choisirons donc l'expérience de Michelson-Morley sur le vent d'éther. Son importance historique a souvent été soulignée - et, d'ailleurs, controversée : elle illustre à merveille, sous la fausse évidence de son interprétation, la complexité du 'statut' de l'expérience.

Cette expérience doit sa célébrité à ce qu'elle a partie liée à la théorie de la Relativité restreinte, bien qu'elle aît été réalisée vingt ans avant la formulation de cette dernière, en relation à un problème d'optique et de mouvement posé à la théorie de l'éther lumineux. Son résultat négatif (l'absence de 'vent d'éther') trouve, avec la théorie de la Relativité restreinte, son explication immédiate: elle résulte directement de l'énoncé sur lequel se fonde cette théorie, à savoir le principe de relativité pour les mouvements d'inertie. Pour certains, elle fut l'«expérience cruciale» sur laquelle la théorie de la Relativité s'est basée. On verra, en fait, combien le statut de l'expérience peut différer, en fonction des conceptions des chercheurs concernés, aussi bien dans la phase de l'élaboration théorique, que dans celle de la réception de la théorie, cette dernière une fois constituée. Ce statut, variable selon les types d'approche des problèmes (les 'styles' scientifiques³) et les contextes, apparaît lié à la nature de l'objet théorique qui est pris en considération, c'est-à-dire, en fin de compte, à la signification que les uns ou les autres attribuent à la théorie de la Relativité.

Rappelons brièvement ce qu'est l'expérience de Michelson, avant toute interprétation de son résultat, en nous en tenant pour l'instant au contexte de sa réalisation, sans nous étendre sur les détails de cette dernière⁴: il suffit, pour notre propos, d'en rappeler l'idée générale. Réalisée en 1881 par le physicien américain Albert A. Michelson, et reprise en 1886 par lui-même et Edward W. Morley, cette expérience visait à mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre par rapport à l'éther, au moyen d'un dispositif optique purement terrestre, constitué d'une source lumineuse, et d'un interféromètre à deux bras horizontaux placés à angle droit, définissant deux directions, l'une suivant le mouvement de la Terre, l'autre perpendiculaire à celui-ci (les deux pouvant d'ailleurs être intervertis à différents moments de l'expérience, pour compenser des erreurs systématiques). Le faisceau lumineux est séparé par des miroirs en deux rayons, l'un longitudinal, l'autre transversal, que l'on fait ensuite se recomposer. La différence des chemins optiques des deux rayons entraîne une figure d'interférence. Dans le calcul du chemin optique, on doit tenir compte du déplacement de la Terre dans la direction longitudinale: si les directions des deux bras sont modifiées par une rotation de l'interféromètre autour de son axe vertical, amenant le bras longitudinal à la position perpendiculaire, on s'attend à observer un déplacement des franges d'interférence, dû à la différence des parcours et du temps de propagation. Lors de sa reprise en 1886, la sensibilité de l'expérience fut accrue par l'adjonction de

³ Paty 1989 b.

⁴ Pour tous détails sur les circonstances de l'expérience elle-même et sur les lectures qui en ont été proposées, je renvoie aux études existantes, en particulier: Holton (1969), Jaffe (1960), Miller (1981), Paty (1987) et (1992 b), Swenson (1972), etc. Sur les reprises ultérieures de l'expérience, cf. Shankland *et al.* (1955).

miroirs semi-transparents supplémentaires qui, placés au centre de l'appareil, réfléchissaient à chaque passage les pinceaux lumineux, rallongeant par ces allers-retours le parcours des rayons⁵.

L'expérience, très précise du point de vue expérimental (elle pouvait déceler un déplacement d'une très petite fraction de frange), était 'au deuxième ordre', ce qui signifie un ordre de grandeur des effets à observer proportionnel à v^2/c^2 (v étant la vitesse de la Terre dans son mouvement autour du Soleil, et c , la vitesse de la lumière dans le vide). Le résultat négatif (absence de déplacement des franges) correspond à l'absence d'évidence pour le vent d'éther. Ce résultat a donné lieu à diverses formulations et interprétations, sur lesquelles nous allons revenir. Celles que la physique contemporaine a retenues sont la non-existence d'un éther électromagnétique, ou encore l'isotropie de la vitesse de la lumière dans l'espace: cette dernière est une traduction du principe de Relativité (restreinte).

Cette expérience et son résultat constituent un exemple riche d'interprétations épistémologiques. Mais les considérations que nous voudrions proposer maintenant ne sont pas limitées à ce cas, et concernent l'expérience en physique, d'une manière plus générale. Nous évoquerons parfois d'autres expériences, propres à illustrer tel trait particulier. Toutefois, les expériences ainsi choisies auront en commun d'avoir été liées, d'une manière ou d'une autre, à une théorie fondamentale.

3. LA QUESTION DE LA VALIDITE D'UN RESULTAT D'EXPERIENCE.

La question de la validité du résultat d'une expérience donnée n'est pas séparable des autres aspects, ni du point de vue historique, ni du point de vue logique. La certitude à l'égard d'un résultat n'est jamais acquise d'emblée, et les scientifiques travaillant dans le domaine concerné en discutent la vraisemblance selon des critères divers, fonction de leur conception de l'expérience et de son statut. C'est que le fait d'expérience ne peut jamais être vraiment dissocié de sa signification, et celle-ci lui donne un 'poids' particulier par rapport à d'autres expériences et résultats. En d'autres termes, la certitude à l'égard d'un résultat expérimental est discutée en regard de la fonction de ce résultat dans le dispositif cognitif.

Les attitudes respectives des physiciens à l'égard de tel résultat d'expérience concernant leurs propres travaux rendent manifeste cette corrélation. Prenons les expériences sur la variation de la masse des électrons⁶ en fonction de

⁵ La différence des temps de parcours des rayons respectivement perpendiculaire et parallèle à la direction du mouvement était ainsi: $\frac{Lv}{c^2}$, L étant la distance parcourue. La longueur de parcours dans l'expérience reprise de 1886 était de 22 mètres, et le déplacement attendu correspondant, pour une rotation de l'interféromètre de 90°, de 0,4 frange. Le résultat expérimental obtenu fut: <0,02 frange, valeur correspondant aux erreurs d'observation.

⁶ Il s'agit de particules issues de la désintégration radioactive (Kaufmann 1906). Il était alors établi que la masse des particules varie en fonction de la vitesse, cette propriété étant généralement rapportée à la nature électromagnétique des corps matériels. Les résultats de Kaufmann montraient

la vitesse réalisées par Kaufmann en 1906. Leur résultat paraissait conclure en faveur des théories d'Abraham et de Bücherer (modèle de l'électron rigide de Max Abraham, modèle de l'électron déformé à volume constant de Bücherer), contre la théorie électrodynamique de Lorentz et contre la théorie de la Relativité restreinte d'Einstein - ces deux dernières, qui sont à certains égards équivalentes, prévoyaient une même variation⁷. Les deux premières théories ne respectaient pas le principe de relativité au contraire des deux autres, et le résultat de Kaufmann paraissait donc mettre en défaut le principe de relativité en électrodynamique.

Avant que le caractère erroné du résultat ne fût établi (à la suite des critiques de l'expérience par Max Planck⁸), les physiciens entretenaient à l'égard de ce résultat des opinions très différentes.

Max Abraham, dont ces expériences favorisaient la théorie, n'avaient aucun doute sur leur validité. Henri Poincaré, qui venait, dans ses travaux sur la dynamique de l'électron, de donner une formulation améliorée et complète de la théorie de Lorentz, avec pour conséquence l'énoncé du principe de relativité, fut ébranlé par le résultat de Kaufmann. Il était prêt à considérer la théorie de Lorentz (et de lui-même) en défaut, et émettait en conséquence des doutes sur le caractère universel du principe de relativité. Les expériences de Kaufmann de 1906, écrivait-il, "ont donné raison à la théorie d'Abraham. Le principe de relativité n'aurait donc pas la valeur rigoureuse qu'on était tenté de lui attribuer" ⁹. Ces doutes étaient toutefois immédiatement tempérés par une remarque sur une faiblesse expérimentale possible (remarque semblable à celle qu'Einstein fit lui-même de son côté). Il ajoutait à la remarque qui précède: "avant d'adopter définitivement cette conclusion, un peu de réflexion est nécessaire. La question est d'une telle importance qu'il serait à désirer que l'expérience de Kaufmann fût reprise..."¹⁰.

Lorentz fut plus durablement ébranlé, admettant que sa théorie, développée de 1892 à 1904, était réfutée par les résultats de Kaufmann, lequel avait, précisément, refait ses expériences avec davantage de précision au vu de la

que la masse des électrons, variant complètement avec la vitesse, était "purement électromagnétique", selon les conceptions de l'époque, sans "résidu" de masse mécanique invariable. La théorie de la Relativité fait de cette variation une propriété très générale, de nature cinématique et non pas dynamique.

⁷ Les diverses théories de l'électron en présence prévoyaient une variation de la masse électromagnétique avec la vitesse, mais suivant des lois différentes. La théorie d'Abraham (électron rigide), et celle de de Bücherer et de Langevin (électron déformable à volume constant) donnaient une première formule, différente de celle prédite par les théories de Lorentz (dynamique électromagnétique), et d'Einstein (propriété cinématique résultant de la Relativité restreinte). Voir, p. ex., Miller (1981). Les théories de Lorentz et d'Einstein, différentes du point de vue conceptuel, étaient équivalentes quant aux prédictions théoriques.

⁸ Planck (1906). Mais la certitude du point de vue expérimental ne serait acquise que bien plus tard.

⁹ Poincaré (1908), livre 3, chapitre 2 ("La mécanique et l'optique"). Sur les expériences de Kaufmann, cf. Hon (1985), chap. 6. Voir également l'interprétation de Batimelli (1981).

¹⁰ *Ibid.* Poincaré émet l'idée que la mesure du champ électrique, d'où, souligne-t-il, tout dépend, est peut-être une source d'erreur (il pourrait ne pas être uniforme comme on le supposait). Remarque qui, soit dit en passant, montre sa perspicacité physique.

théorie de Lorentz de 1904, pour la départager d'avec celle d'Abraham¹¹. Il écrivait à Poincaré, en 1906¹²: "Il me semble impossible d'établir une théorie qui exige l'absence complète d'influence de la translation sur les phénomènes de l'électricité et de l'optique", c'est-à-dire le principe de relativité.

Einstein fut, pour sa part, d'emblée critique à l'égard de l'expérience, faisant valoir le caractère invraisemblable du résultat quand on le mettait en balance avec la force du principe de relativité, qui s'imposait par un ensemble très puissant de raisons théoriques et expérimentales (et qui d'ailleurs était un principe de sa théorie, non une conséquence déduite d'autres propriétés)¹³. Pour Einstein, une expérience sur la variation de la masse en fonction de la vitesse constituait un autre test du principe de relativité considéré dans toute son universalité. Ce test était certes, considérant la variation prédite, médiatisé par la théorie (sous la forme qu'il lui avait lui-même donnée ou sous celle, équivalente à cet égard, de Lorentz), mais cette dernière avait à ses yeux, comme *théorie* de la Relativité, découlant du seul principe indiqué, valeur contraignante. Ce n'était pas le test d'un simple 'modèle de l'électron'.

Einstein soulignait d'ailleurs qu'il serait nécessaire, pour parvenir à une conclusion, de prendre en compte beaucoup de données d'observation et non une seule expérience. En maintenant que les résultats de Kaufmann n'étaient pas suffisants pour infléchir le choix théorique, il faisait intervenir deux considérations. La première était de nature expérimentale: il s'interrogeait sur le caractère éventuellement défectueux du dispositif par la présence d'erreurs systématiques qui n'auraient pas été prises en compte (ce faisant, il anticipait en fait la conclusion à laquelle parviendraient Guye et Lavanchy en 1916, par leurs propres expériences)¹⁴. L'autre considération était de nature théorique, et c'est elle, à vrai dire, qui guidait ses doutes quant à l'exactitude du résultat expérimental. "A mon avis", écrivait Einstein¹⁵, "les deux théories [d'Abraham et de Bücherer] ont une probabilité plutôt faible, parce que leurs hypothèses fondamentales sur la masse des électrons en mouvement ne sont pas explicables en termes de systèmes théoriques qui puissent embrasser un complexe plus grand de phénomènes". Soit dit en passant, cette argumentation montre comment - selon Einstein - l'expérience et les considérations théoriques s'accompagnent. Elle exprime le caractère nécessaire de l'expérience - que la théorie ne saurait contredire -, mais, en même temps, souligne que l'expérience doit faire l'objet d'une évaluation critique. (Et, dans cette évaluation, l'on s'appuie sur ce guide de l'intuition ou du sens physique qu'est la théorie, elle-même étayée sur un grand nombre de données d'expérience

¹¹ Dans une conférence à l'Université Columbia, en 1906 (publiée en 1909), Lorentz exprime l'idée que le résultat était contraire à son idée de contraction et réfutait sa théorie de l'électron. Toutefois, le résultat le confortait dans son idée de l'image électromagnétique du monde. Cf. Hon (1985).

¹² Cité par Miller 1981, p. 334.

¹³ En tant que 'principe' physique, il était lui-même rattaché à des résultats expérimentaux antérieurs, mais selon une modalité que nous ne pouvons développer ici. Cf. Paty (1992 b).

¹⁴ Guye, Lavanchy (1916).

¹⁵ Dans son article de revue sur le principe de relativité de 1907 (Einstein 1907).

acquises antérieurement).

L'expérience ne se ramène pas à une simple accumulation d'informations et doit être organisée, réfléchie, critiquée. Citons encore, du même Einstein, à propos d'un résultat d'observation concernant cette fois la théorie de la Relativité générale, une remarque dans ce sens, soulignant la nécessité de méthodes sûres d'analyse expérimentale. Discutant la signification des mesures effectuées par l'astronome Julius sur le spectre solaire (la recherche du décalage vers le rouge constituait l'un des trois tests alors pensables de la Relativité générale), Einstein soulignait en ces termes la nécessité de disposer d'un étalon terrestre: "Les recherches de Julius sont certainement intéressantes, elles infirment l'existence du déplacement vers le rouge, mais ne démontrent rien du tout. L'amoncellement de matériel ne sert à rien si l'on n'a pas, auparavant, examiné comme il faut les sources terrestres de lumière et analysé les deux spectres à l'aide du spectrophotomètre"¹⁶.

4. L'ENONCE DU RESULTAT D'EXPERIENCE: LE FAIT ET LA LOI.

Le résultat d'expérience se traduit en l'énoncé d'un fait et, si ce fait est de quelque généralité, en une 'loi phénoménologique' (dans le sens que les scientifiques donnent à ce terme, c'est-à-dire se contentant de décrire des propriétés de phénomènes). La question se pose naturellement de savoir dans quelle mesure ce fait ou cette loi sont indépendants de toute théorie. Selon la thèse de l'imprégnation théorique (cf. Duhem, Bachelard, et la 'theory laddenness' des anglo-saxons), ce n'est jamais le cas, ce qui me paraît exact dans l'absolu: mais il est possible, cependant, de distinguer différents degrés d'imprégnation théorique, et de conclure au caractère relatif de cette dernière. Le langage 'spontané' des scientifiques a cet intérêt d'être révélateur d'une pratique, et la qualification de *théorique* ou d'*empirique* telle qu'ils la proposent se rapporte en général à un état de connaissances constitué à une stade avancé ou, au contraire, dans une phase préliminaire d'élaboration. L'énoncé d'un résultat expérimental est rarement (voire n'est jamais) un énoncé simplement 'factuel', ou universellement empirique: c'est un énoncé factuel interprété. Du moins lorsqu'on considère de tels énoncés suffisamment généraux, concernant une loi de validité universelle: des énoncés de ce genre peuvent être appelés 'faits', ou 'lois'. Bien que ces faits et lois ne soient pas seulement empiriques, sous leur formulation 'interprétée' se tient un état de choses qui ne varie pas d'une théorie à une autre, qui est commun aux diverses formulations théoriques, et que l'on peut pour cette raison qualifier simplement d'*'empirique'*¹⁷.

¹⁶ Einstein, lettre à Michele Besso, 26.7.1920, lettre n° 52.1, in Einstein, Besso (1972). Voir encore les remarques du même Einstein sur l'expérience de D. Miller, qui refit l'expérience de Michelson vers 1930.

¹⁷ Ce qui ne préjuge pas des circonstances dans lesquelles le résultat aura été acquis; elles sont tributaires à quelque degré d'une préoccupation théorique (peut-être caduque en regard de la validité du résultat).

Nous admettons, dans ce sens - et c'est là faire une part encore belle au point de vue empiriste -, qu'il existe des faits et des lois 'purement empiriques' s'ils n'appellent pour leur énoncé complet que des propositions dont la formulation est indépendante de la théorie que l'on a en vue (pour laquelle l'expérience est supposée constituer un test). La question est, dès lors, celle de la signification du résultat d'expérience pour la ou les théories considérées.

A cet égard, l'énoncé du résultat de l'expérience de Michelson-Morley, dans sa formulation antérieure aux théories électrodynamiques, est déjà exprimé par rapport à une problématique théorique, celle des théories de l'éther optique alors en présence et de la façon dont elles considéraient les effets du mouvement des corps (un problème posé depuis que la théorie ondulatoire de la lumière eût à expliquer l'aberration des étoiles)¹⁸. Ces théories étaient essentiellement celle de l'éther immobile de Fresnel (la perméabilité des corps à l'éther permettait l'hypothèse d'un entraînement partiel, posé en termes de coefficient d'entraînement par Fresnel dès 1818), et l'éther en mouvement de Stokes¹⁹. Dans la théorie de Stokes, l'éther étant totalement entraîné, le coefficient de Fresnel ne trouvait pas de justification immédiate, alors qu'il avait été mis en évidence par l'expérience de Fizeau en 1851²⁰. Michelson croyait pouvoir conclure, du résultat négatif de son expérience de 1881 sur le déplacement des franges ²¹, que la théorie de Fresnel était invalidée au profit de celle de Stokes, raisonnement d'ailleurs contesté par Lorentz.

Quand Lorentz s'intéressa pour la première fois à l'expérience de Michelson, en 1886 ²², c'était avant d'avoir proposé sa théorie électrodynamique, et la lecture qu'il donna du résultat le fut alors en termes des théories disponibles, purement optiques, de l'éther lumineux. Il faisait observer que, malgré les résultats de l'expérience de Fizeau²³ qui corroboraient l'hypothèse de Fresnel de l'entraînement partiel de l'éther²⁴, les phénomènes connus jusqu'alors ne suffisaient pas à conclure quant à "la question de savoir si l'éther prend part ou non au mouvement de la Terre"²⁵. Par contre, l'expérience de Michelson lui paraissait permettre de conclure sur ce point, puisque, étant du second ordre en v/c , son interprétation n'était pas affectée par le coefficient de Fresnel (relatif aux

¹⁸ Cf. Mayrargue (1991).

¹⁹ Sur les théories de l'éther, cf. Whittaker (1910).

²⁰ Fizeau (1851). Sur la confrontation entre les théories de l'éther et le problème du mouvement, voir la discussion très perspicace et approfondie donnée par Lorentz (1886, cf. la version de 1887, p. 162-176).

²¹ Michelson (1881).

²² Lorentz (1886).

²³ Fizeau (1851). Lorentz exprime ainsi le résultat de l'expérience de Fizeau: "Le résultat de cette expérience prouvait [...] que les ondes lumineuses ne participent que partiellement au mouvement du milieu" [à savoir le courant d'eau]. Comme on le sait, la sensibilité de l'expérience était du premier ordre en v/c . Voir Paty (1992 b), Mayrargue (1991), Oliveira (en prép.).

²⁴ Lorentz assignait la détermination théorique du coefficient comme étant la tâche de la théorie de la lumière à venir (qu'il proposerait quelques années plus tard : cf. Lorentz (1892) et ses élaborations ultérieures).

²⁵ Lorentz (1886), version de 1887, p. 162.

effets du premier ordre). Il s'agissait donc, aux yeux de Lorentz, d'une expérience importante par elle-même, ce qui n'en justifiait que davantage la nécessité d'être assuré de la validité de son résultat. (Nous sommes ici renvoyés en partie aux considérations qui précèdent: le résultat de l'expérience de Michelson était alors considéré comme contraire à celui de l'expérience de Fizeau, qui, lui, favorisait la théorie de Fresnel: d'où les interrogations de Lorentz sur la signification du résultat).

L'analyse critique que Lorentz fit de l'expérience de Michelson²⁶ amena ce dernier à la refaire, avec Morley, en 1886; le résultat, toujours négatif, mais mieux étayé, fut homologué comme un fait ²⁷. Pour autant, son interprétation en termes d'une supériorité de la théorie de Stokes sur celle de Fresnel ne s'imposait pas, car d'autres considérations sur l'accord respectif de ces théories avec l'ensemble des phénomènes de l'optique et du mouvement devaient être prises en compte, qui favorisaient la théorie de Fresnel des ondes lumineuses transversales conçues comme des ébranlements de l'éther immobile. L'attitude de Lorentz est à cet égard significative: si la théorie de l'éther totalement entraîné de Stokes pouvait rendre compte d'une absence de déplacement des franges dans l'expérience de Michelson, elle ne fournissait pas d'explication satisfaisante de l'aberration des étoiles et du coefficient de Fresnel, corroboré par l'expérience de Fizeau²⁸. Aucun caractère 'crucial' ne parut donc attaché à l'expérience de Michelson relativement à une théorie particulière de l'éther; restait évidemment à concilier ce résultat et la théorie de l'éther de Fresnel, laquelle paraissait à Lorentz présenter de plus grands avantages, pour les raisons indiquées. Ce fut à cette conciliation que Lorentz s'attacha en proposant ensuite son hypothèse de la contraction des longueurs dans le sens du mouvement. Mais il l'effectua dans un contexte théorique différent, qui n'était plus seulement celui de la théorie de Fresnel, mais celui de la théorie électromagnétique de la lumière qui permettait de calculer exactement le coefficient de Fresnel ²⁹. Où l'on voit à l'évidence que le résultat expérimental fait ici partie de l'ensemble des considérations de l'élaboration théorique (et l'on ne trouve rien qui puisse être qualifié d'«anomalie»).

Nous pouvons considérer à ce stade que le résultat de l'expérience de Michelson et Morley se trouve détaché des théories auxquelles il était apparu

²⁶ Lorentz (1886, p. 168-176, 1895, § 89). Lorentz décela une erreur dans le travail de Michelson de 1881: ce dernier avait pris pour valeur du changement de la différence de phase donnée par la théorie le double de la vraie valeur. Si l'on tenait compte de la correction, les déplacements théoriques étaient inférieurs aux erreurs d'observation, de sorte que le résultat négatif ne permettait pas de conclure.

²⁷ Michelson, Morley (1886, 1887). Ce qui ne préjuge pas de l'éventualité de le remettre en cause par des expériences plus précises. Dans les années 1920, D. Miller annonça un résultat négatif, dont il fut par la suite démontré qu'il était dû à une erreur systématique dans le dispositif (cf. Swenson 1972).

²⁸ Lorentz (1892 a et b).

²⁹ Et il impliquait donc en fait la supériorité de la théorie de Fresnel sur celle de Stokes. Cf. Lorentz (1895), § 89. Lorentz proposa son hypothèse dès 1892-1893 et FitzGerald fit de même de son côté (dans des conférences, mentionnées dans un article de Lodge, "Aberration problems", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 184 A, 1893).

initialement lié. C'était avant tout un fait d'expérience, qui devrait, certes, trouver son explication théorique, mais qui pouvait être énoncé indépendamment d'une théorie. Mais cet acquis est rétrospectif: si le résultat au sens strict est 'l'absence de déplacement de franges', la motivation et la constitution de l'expérience qui aboutit à ce résultat étaient fonction d'arguments théoriques, et c'est en termes théoriques que le premier énoncé du résultat fut proposé. "Michelson conclut que, lorsque la Terre se meut, l'éther ne demeure pas en repos", résumera Lorentz en 1904: sous son apparente neutralité, même si l'on oublie la référence aux théories de Stokes et de Fresnel, cette formulation, qui représente effectivement la position de Michelson, est bel et bien de nature théorique.

Toujours est-il que, même s'il conteste la formulation de Michelson, Lorentz admet la validité du résultat expérimental qu'elle recouvre. Il l'exprime pour sa part autrement, mais toujours en relation à une préoccupation théorique: si l'aberration exige de garder la théorie de Fresnel et le coefficient d'entraînement, il faudra "éliminer la contradiction entre [la théorie] et le résultat de Michelson"³⁰. Dès lors, "le résultat négatif [de l'expérience de Michelson]", énoncé (sybillin) sous lequel se présente désormais ce fait expérimental, se voit transcrit en une autre formulation, qui est en vérité une explication, mais se voulant aussi neutre que possible par rapport aux théories de l'optique et de l'éther, à savoir "la conclusion que les dimensions des corps solides sont légèrement altérées par leur mouvement à travers l'éther"³¹.

Le caractère trop particulier, spécifique, et par là précaire, de cette formulation-explication hypothétique, critiqué par Poincaré³², amena Lorentz à rechercher une hypothèse plus fondamentale susceptible de justifier l'indépendance des actions électromagnétiques par rapport au mouvement des systèmes³³. Cette hypothèse fondamentale, dont l'effet s'étend au-delà du seul résultat de l'expérience de Michelson (à savoir aux autres expériences du deuxième ordre alors disponibles, celles de Rayleigh et Brace, et de Trouton et Noble), ce fut la transformation générale dite 'de Lorentz', posée d'emblée, et dont la propriété d'invariance entraînait le principe de relativité. Dans cette reconstruction théorique, dont Poincaré reprit à son compte la démarche, l'hypothèse s'appuie sur le fait d'expérience, mais ce dernier a servi de base - ou de prétexte - à une inférence plus générale. Mais ce fait, néanmoins, s'y trouve privilégié. Il aurait pu l'être moins, comme c'est le cas avec le travail d'Einstein. Mais nous voyons que, même privilégié, ce fait s'accompagne de considérations de nature théorique sans lesquelles sa signification supposée ne pourrait être appréhendée.

³⁰ Lorentz (1895).

³¹ Conclusion à laquelle Lorentz indique avoir été conduit, ainsi que FitzGerald (les deux indépendamment), par le "résultat négatif" en question (Lorentz 1904).

³² Poincaré indiqua, en 1900, qu'il serait souhaitable de ne pas avoir à proposer une hypothèse particulière à chaque résultat expérimental nouveau.

³³ Lorentz (1904).

5. L'EXPERIENCE COMME POINT DE DEPART D'UN TRAVAIL THEORIQUE.

Evoquons encore d'autres aspects sous lesquels on doit considérer la notion de résultat expérimental dans ses effets de signification. C'est, tout d'abord, *l'expérience comme point de départ d'un travail théorique*: on peut estimer que l'hypothèse de la contraction de Lorentz, formulée pour tenir compte de l'expérience de Michelson et Morley, est de cette sorte. Mais ce n'est pas là une norme obligée, inévitablement attachée à cette expérience: tout ce que l'on peut dire, c'est que telle fut, historiquement, la voie de Lorentz, dans les circonstances que nous venons d'évoquer.

Ce qui importe, ici, c'est la manière dont cette expérience est vue, en relation aux théories possibles, par un chercheur donné: ce statut est particulier, spécifique dans chaque cas. On ne peut le réduire à une méthodologie générale, telle, par exemple, la conception des 'anomalies' proposée par Kuhn et reprise par d'autres auteurs. Il serait d'ailleurs difficile de prétendre que Lorentz considérait le résultat de Michelson comme une anomalie: il parle plutôt d'une *contradiction* qu'il faudrait *lever*, et il ne lui donne pas au début un statut privilégié, puisqu'elle est à mettre en balance avec d'autres résultats (l'aberration, l'expérience de Fizeau, etc.). Il se trouve que, dans le travail de Lorentz de 1892, ce n'est pas ce résultat qui a le rôle central par rapport à la théorie et qui détermine le choix de cette dernière; c'est, au contraire, la considération d'un ensemble d'autres résultats qui lui permet d'asseoir le choix de la théorie de Fresnel de l'éther immobile, laquelle constitue alors ce qui du point de vue théorique lui paraît important. On ne peut séparer les éléments de ce travail en, d'un côté, une théorie constituée, de l'autre un résultat déviant, puisque la théorie se constitue en même temps et par le même raisonnement qui fait mettre de côté le résultat de l'expérience de Michelson, pour lequel Lorentz fait l'hypothèse que ce résultat n'est pas celui qui est déterminant pour le choix théorique³⁴. C'est seulement par la suite que ce résultat s'avèrera de plus en plus important, lorsque la formule de contraction des longueurs acquerra, dans la théorie de Lorentz, un caractère central.

Il reste que, dans le travail ultérieur de Lorentz, cette formule et l'hypothèse correspondante sont posées en réponse immédiate au résultat de l'expérience de Michelson. En ce sens, l'expérience est, *à ce stade*, le point de départ de cette *hypothèse* précise; mais l'on n'est pas en droit de dire qu'elle est le point de départ de la *théorie* elle-même, puisque le corps essentiel de cette dernière est constitué par la théorie de Fresnel de l'éther immobile désormais sous-tendue par la théorie électromagnétique de Maxwell, qui permet de calculer tous les éléments de la théorie de Fresnel, y compris le coefficient d'entraînement³⁵.

L'on ne peut donc faire l'économie des raisonnements antérieurs et isoler, sur cette table rase, l'expérience au résultat encore inexpliqué. C'est, en vérité, seulement à la faveur d'une réorganisation ultérieure du matériau théorique

³⁴ Lorentz (1892 a).

³⁵ Lorentz (1892 a, 1895). C'est dans cette perspective qu'Einstein se réfère toujours, de façon significative, à la théorie de Lorentz comme à cette théorie électrodynamique, avant l'hypothèse de contraction.

que Lorentz présentera le résultat de l'expérience de Michelson comme le point de départ de sa théorie de l'électrodynamique des corps en mouvement dans sa formulation finale. Dans son travail de 1904, le résultat de l'expérience de Michelson sert, d'entrée, à justifier l'hypothèse de contraction à partir de laquelle il propose les formules de transformation de coordonnées (transformations de Lorentz) qui sont celles de la Relativité restreinte, et reformule l'électrodynamique en conséquence³⁶. Poincaré fait de même dans son article de 1905 (paru en 1906), qu'il veut un simple perfectionnement de la théorie de Lorentz (mais qui représente, du point de vue théorique, bien davantage)³⁷. L'on voit comment ce "point de départ" n'est tel que selon un point de vue, qui est celui d'une réorganisation conceptuelle synthétisant tout un processus d'élaboration antérieure.

Remarquons en outre que, même à ce stade d'élaboration, le point de vue de "l'expérience comme point de départ de la théorie" n'est pas univoque. La même expérience, dont le résultat est accepté, servira, ou ne servira pas, de point de départ privilégié d'un travail théorique³⁸. Le rôle de l'expérience de Michelson et Morley est considérée différemment, selon leurs programmes respectifs, par Lorentz et Poincaré d'un côté, par Einstein de l'autre: mais si Einstein raisonne différemment, cela ne veut pas dire qu'il ait ignoré cette expérience³⁹. Nous dirons plutôt que son attitude à son égard est, en 1905, du même ordre que celle de Lorentz en 1892 (mais dans un contexte différent et avec une tout autre perspective théorique): il la considère comme une expérience parmi d'autres (à la différence de ce qu'il en était pour Lorentz en 1892, son résultat va dans le même sens que les autres expériences considérées⁴⁰), et c'est l'ensemble de telles expériences qui le conduit à énoncer *comme un fait* un principe théorique, le principe de relativité. Dans le cas du travail d'Einstein, si l'expérience est le point de départ de la théorie, on voit comment il faut l'entendre: ce n'est pas *une* expérience particulière, mais un ensemble d'expériences considérées comme révélatrices d'un phénomène physique, phénomène dont l'énoncé même résulte d'une pensée théorique.

6. AUTRES REMARQUES.

Un autre aspect à considérer serait celui de l'expérience comme *pierre de touche d'une théorie*. Comme il a été souvent discuté, nous n'en dirons ici que peu de choses. On considère en général, sous ce point de vue, l'antériorité de la prédiction théorique par rapport à l'expérience. Mais il se peut aussi qu'il s'agisse d'une expérience antérieure à la théorie, dont il apparaît finalement, à la lumière

³⁶ Lorentz (1904).

³⁷ Poincaré (1905). Cf. Miller (1981), Paty (1987 et 1992 b), Zahar 1989.

³⁸ Je renvoie, à ce propos, à la question des 'styles scientifiques' (Paty 1989 b).

³⁹ Paty (1989 a, et 1992 b).

⁴⁰ Bien que certaines de ces expériences soient les mêmes: ainsi, l'expérience de Fizeau. Ceci parce que l'interprétation théorique de ces expériences n'est pas la même.

de la réorganisation des concepts et des principes par la théorie, qu'elle constitue la vérification la plus probante (c'est en quelque sorte une 'pierre de touche rétrospective'). Dans le cas d'une réponse négative par rapport à une prédiction inédite, nous savons qu'il existe toujours la possibilité de modifier les hypothèses, d'en ajouter qui soient *ad hoc*, et qu'il n'y a donc pas d'*experimentum crucis*.

Tenons-nous en provisoirement là, sans pouvoir faire le tour des rapports de l'expérience à la théorie. Le moins que l'on puisse dire est que le rôle de l'expérience dans le processus de connaissance est plus varié et complexe que ne le laisse à première vue entendre la qualification, pour une discipline scientifique comme la physique, de "science empirique". Disons, en forme de conclusion provisoire, que la physique serait mieux qualifiée par les termes de 'science à contenu empirique', qui laissent ouvertes devant nous des questions aussi passionnantes et délicates que la nature d'une connaissance scientifique, en particulier d'une connaissance théorique, et le rapport de la construction formelle au contenu...

BIBLIOGRAPHIE.

ABRAHAM, Max (1903). "Prinzipien der Dynamik des Elektrons", *Annalen der Physik* 10, 1903, 105-179.

BATIMELLI, Gianni (1981). "The electromagnetic mass of the electron: a case study of non-crucial experiment", *Fundamenta scientiae* 2, 1981, 137-150.

BORN, Max (1920). *Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen, elementar Dargestellt*, Springer, Berlin, 1920. Trad. angl. par H. L. Bose, *Einstein's theory of relativity*, Methuen, New York, 1924. Ed. révisée et augmentée, avec la collaboration de Gunther Liebfried et Walter Biem, Dover, New York, 1962.

GUYE, Charles-Eugène et LAVANCHY, Charles (1916). "Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse", *Archives des sciences physiques et mathématiques* (Genève) 41, 1916, 286 ; 353 ; 441.

HOLTON, Gerald (1969). "Einstein, Michelson and the 'crucial experiment', *Isis*, 60, 1969, 133 sq.; tr. fr. in Holton, G., *L'invention scientifique. Thémata et interprétation*, trad. de l'anglais par Paul Scheurer, Presses Universitaires de France, Paris, 1982.

EINSTEIN, Albert (1905). "Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921. Trad. fr. par Maurice Solovine, "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement", Gauthier-Villars, Paris, 1925

EINSTEIN, Albert (1907). "Ueber das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität*, IV, 1907, 411-462 ; V, 1908, 98-99 (Berichtigungen, errata).

EINSTEIN, Albert et BESSO, Michele (1972 a). *Correspondance 1903-1955*, publiée par Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972. Nouvelle éd. (trad. fr.), 1979.

FIZEAU, Hippolyte (1851). "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Compte-rendu des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 33, 1851, 349-355.

HON, Giora (1985). *On the concept of experimental error*, Ph D. Thesis, London University, 1985.

JAFFE, Bernard 1960. *Michelson and the speed of light*, Doubleday, New York, 1960.

KAUFMANN, Walter 1906. "Ueber die Konstitution des Elektrons", *Annalen der Physik* 19, 1906,

487-553 ; 20, 1906, 639-640 ("Nachtrag su der Abhandlung 'Ueber die...'").

LORENTZ, Hendryk Antoon 1886. "De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux", *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam* 2, 1886, 297 suiv. et *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* IX, 1887, 103-176. Repris in Lorentz 1935-1939, vol. 4, p. 153-214.

LORENTZ, Hendryk Antoon 1892 a. "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants", *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 25, 1892, 363-553. Repris in Lorentz 1935-1939, vol. 4, p. 164-343.

LORENTZ, Hendryk Antoon 1892 b. "The relative motion of the Earth and the Ether", *Versl. Kon. Akad. Wetensch., Amsterdam* 1, 1892, 74 suiv. Repris in Lorentz 1935-1939, vol. 4, p. 219-223.

MAYRARGUE, Arnaud (1991). "De l'aberration des étoiles à l'éther de Fresnel", Thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Equipe REHSEIS, Université Paris 7, déc. 1991.

MICHELSON, Albert A. 1881. "The relative motion of the earth and the luminiferous ether", *American Journal of Science*, 22, 1881, 120-129.

MICHELSON, Albert A. and MORLEY, Edward W. 1886. "Influence of motion of the medium on the velocity of light", *American Journal of Science*, 31, 1886, 261-270.

MICHELSON, Albert A. and MORLEY, Edward W. 1887. "On the relative motion of the earth and the luminiferous ether", *American Journal of Science*, 34, 1887, 333-345.

MILLER, Arthur I. 1981. *Albert Einstein's special theory of relativity. Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1981.

OLIVEIRA, Mauricio Pinto Pietrocola de (en prép.). "L'optique des corps en mouvement dans l'oeuvre d'Elie Mascart", Thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Equipe REHSEIS, Université Paris 7, en préparation.

PATY, Michel (1984). "Mathématisation et accord avec l'expérience", *Fundamenta scientiae* 5, 1984, 31-50.

PATY, Michel (1987). "The scientific reception of Relativity in France", in Glick, Thomas (ed.), *The Comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987, p. 113-167.

PATY, Michel (1988). *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988

PATY, Michel (1989 a). "Einstein e a experiência de Michelson", *Perspicillum* (Rio de Janeiro) 3, 1989 (n°1, abril), 77-104.

PATY, Michel (1989 b). "Sur l'histoire et la philosophie de la découverte scientifique : champs de rationalité, styles scientifiques, traditions et influences", in D'Ambrosio, Ubiratan (org.), *Anais do segundo Congresso latino-americano de historia da ciências e da tecnologia, Sao Paulo, 30 de junho a 4 de julho de 1988*, Nova Stella, Sao Paulo, 1989, p. 26-40. Repris dans Paty 1990, chap. 4, p. 59-80.

PATY, Michel (1990). *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, L'Harmattan, Paris, 1990.

PATY, Michel (1992 a). "L'endoréférence d'une science formalisée de la nature", in Craig Dilworth (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, p. 73-110.

PATY, Michel (1992 b). *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1992.

PLANCK, Max (1906). "Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der β -Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen", *Physikalische Zeitschrift* 7, 1906, 753-761.

POINCARÉ, Henri (1908). *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908.

SHANKLAND, Robert S.; MCCUSKEY, Leone, F.C. and KUERTI, G. (1955). "New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller", *Review of Modern Physics* 27, 1955, 167-178.

SWENSON, Lloyd S. Jr. 1972. *The ethereal aether: a history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments, 1880-1930*, University of Texas Press, Austin, 1972.

WHITTAKER, Sir Edmund T. 1910. *A History of the theories of aether and electricity: from the*

age of Descartes to the close of nineteenth century, Longmans, Green and C^o, London and New York, 1910. New ed. rev. and enlarged: *A History of the theories of aether and electricity, vol. 1: the classical theories*, Nelson, London and New York, 1951.